

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه الکترونیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته‌ی مهندسی برق - الکترونیک گرایش طراحی مدارات مجتمع آنالوگ و دیجیتال

عنوان فارسی

طراحی سنتزکننده فرکانسی N - کسری برمبنای مدولاسیون نوع مستقیم برای استفاده در استاندارد ZigBee

عنوان انگلیسی

**Design of Direct Modulation based Fractional-N Frequency Synthesizer for
ZigBee Standard**

اساتید راهنما

دکتر جعفر صبحی دکتر ضیاءالدین دایی کوزه کنانی

استاد مشاور

مهندس علی صحافی

پژوهشگر

سیروس فارسیانی

شهریور ۱۳۹۳

نام خانوادگی دانشجو: فارسیانی	نام: سیروس
عنوان پایان‌نامه: طراحی سنتز کننده فرکانسی N - کسری برمبنای مدولاسیون نوع مستقیم برای استفاده در استاندارد ZigBee	
اساتید راهنما: دکتر جعفر صبحی ، دکتر ضیاءالدین دائی کوزه کنانی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی برق
گرایش: الکترونیک	دانشگاه: تبریز
دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر	تاریخ دفاع: ۹۳/۶/۱۶
	تعداد صفحات: ۱۲۸
چکیده:	
<p>ZigBee استاندارد دسته ایی از پروتکل‌های ارتباط سطح بالا است که در فرستنده و گیرنده‌های کم مصرف مبتنی بر استاندارد IEEE802 برای شبکه‌های شخصی بی سیم با نرخ ارسال داده پایین استفاده میشود. ZigBee به منظور تعریف یک تکنولوژی ساده تر و ارزاتر از بلوتوث برای شبکه‌های ارتباطی شخصی بیسیم بوجود آمده است. ویژگی‌های استاندارد ZigBee عبارتند از کار در محدوده فرکانس 2.4 GHz با سرعت انتقال 250 kb/s و برد 10 تا 100 متر (بسته به قدرت فرستنده و ویژگی‌های محیط).</p> <p>یکی از بخش‌های مهم و اساسی در فرستنده و گیرنده‌های فرکانس بالا (از جمله در فرستنده - گیرنده‌های مبتنی بر ZigBee) سنتز کننده فرکانسی می باشد که به عنوان مداری برای سنتز و مدوله دقیق سیگنال‌های فرکانس بالا مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از انواع سنتز کننده های فرکانسی که به صورت گسترده در مدارات مجتمع سیستم‌های مخابراتی مورد استفاده قرار می گیرد PLL می باشد. PLL یک سیستم کنترلی است که سیگنال خروجی تولید می کند که فاز آن متناسب با سیگنال ورودی است. این بلوک می تواند برای انجام دمدولاسیون یک سیگنال ، بازیابی یک سیگنال دریافتی از یک کانال مخابراتی نویزی ، تولید سیگنال خروجی در مضاربی از فرکانس سیگنال ورودی و نیز توزیع دقیق پالس ساعت در مدارات Logic دیجیتال مانند ریزپردازنده ها ، استفاده شود.</p> <p>عنوان این پروژه طراحی سنتز کننده فرکانسی برمبنای مدولاسیون نوع مستقیم برای استاندارد ZigBee می باشد که از دو بخش طراحی Fractional-N PLL و پیاده سازی مدولاسیون مستقیم با آن تشکیل شده است. با انجام مدولاسیون مستقیم به وسیله سنتز کننده می توان حداقل بلوک میکسر در مسیر ارسال داده ی یک گیرنده - فرستنده ی رادیویی را حذف کرد که این امر باعث کاهش توان مصرفی و فضای اشغالی سیستم می شود. سنتز کننده طراحی شده در این پروژه مشخصات مورد نیاز استاندارد ZigBee را کاملاً برآورده می کند. از این گذشته ، با معرفی یک ساختار جدید برای پیاده سازی تقسیم کننده فرکانسی ، توان مصرفی این بلوک را به میزان قابل توجهی کاهش دادیم. علاوه بر آن با بهینه سازی بلوکهای دیگر موفق شدیم توان مصرفی سیستم را به حدود 4.8 mW کاهش دهیم. برای پیاده سازی مدولاسیون مستقیم از تکنیک تزریق جریان آفست به فیلتر استفاده کرده و موفق شدیم به نرخ داده ی 714 kbps برسیم.</p>	
کلید واژه :	
سنتز کننده فرکانسی ، حلقه قفل فاز ، مدولاتور دلتا - سیگما ، مدولاسیون مستقیم ، استاندارد ZigBee	

فهرست مطالب

فهرست مطالب	i
فهرست اشکال	v
فهرست جداول	ix
۱- مقدمه	۱
۲- استاندارد ارتباطی برد کوتاه: IEEE 802.15.4/ZIGBEE	۴
۲-۱- تعریف استاندارد IEEE 802.15.4/ZIGBEE	۵
۲-۲- کاربردهای ZIGBEE	۷
۲-۳- باندهای فرکانسی ZIGBEE	۷
۲-۴- مدولاسیون	۹
۲-۵- مشخصات استاندارد ZIGBEE	۱۲
۳- مبانی سنتزکننده های فرکانسی و حلقه های قفل فاز	۱۳
۳-۱- سنتزکننده های فرکانسی در گیرنده - فرستنده ها	۱۳
۳-۲- انواع سنتزکننده های فرکانسی	۱۴
۳-۲-۱- سنتزکننده های فرکانسی مستقیم آنالوگ (DAS)	۱۴
۳-۲-۲- سنتزکننده های فرکانسی مستقیم دیجیتال (DDS)	۱۵
۳-۲-۳- سنتزکننده های فرکانسی PLL	۱۶
۳-۳- مدل خطی PLL	۱۷
۳-۴- Fractional-N PLL	۲۵
۳-۵- معرفی نویز فاز	۲۸
۳-۶- معرفی تن های ناخواسته	۳۰
۳-۷- اثرات مخرب نویز فاز و تن های spur در سیستم های مخابراتی	۳۱
۳-۸- آنالیز نویز فاز PLL	۳۲

۳۸.....	Fractional – N	۴- بلوک های سازندهی سترکننده فرکانسی
۳۸.....	Phase Detector / Phase Frequency Detector (PD/PFD) -۱-۴	
۳۸.....	XOR	۴-۱-۱- PD مبتنی بر گیت XOR
۴۰.....	RS	۴-۱-۲- PD مبتنی بر فلیپ فلاپ RS
۴۱.....	Tri-state Phase Frequency Detector (PFD) -۳-۱-۴	
۴۴.....		۴-۲- پمپ بار
۴۷.....		۴-۲-۱- عدم تطابق پالسهای ورودی پمپ بار
۴۹.....	mismatch	۴-۲-۲- بین منابع جریانی پمپ بار
۵۰.....	VCO-۳-۴	
۵۳.....		۴-۴- تقسیم کنندهی فرکانسی
۵۴.....	Pulse Swallow Divider -۱-۴-۴	
۵۶.....	Modular divider -۲-۴-۴	
۵۹.....	Logic	۴-۴-۳- مورد استفاده برای پیاده سازی تقسیم کننده
۵۹.....	CML	۴-۴-۳-۱- گیتهای CML
۶۰.....	TSPC	۴-۴-۳-۲- گیتهای TSPC
۶۲.....		۴-۵- مدولاتورهای دلتا - سیگمای دیجیتال
۶۷.....		۴-۵-۱- توپولوژی های مدولاتور دلتا - سیگما
۶۸.....	Single-Quantizer	۴-۵-۱-۱- مدولاتورهای دلتا-سیگمای دیجیتال
۶۹.....		۴-۵-۱-۲- مدولاتورهای با فیدبک خطا
۷۰.....	MASH	۴-۵-۱-۳- مدولاتورهای MASH
۷۳.....		۴-۵-۲- افزایش دوره تناوب عملکرد مدولاتور دلتا-سیگمای دیجیتال
۷۳.....	Non-shaped LSB dithering -۱-۲-۵-۴	
۷۴.....	Shaped LSB Dithering -۲-۲-۵-۴	

۷۷.....	۵- بررسی منابع
۷۷.....	۵-۱- طراحی PLL نوع Fractional-N پهن باند برای فرکانس 2.4 GHz
۷۸.....	۵-۱-۱- DAC Feedforward Cancellation
۸۰.....	۵-۱-۲- خطی سازی مشخصه ی PFD/CP :
۸۲.....	۵-۱-۳- پیاده سازی مدار ی
۸۴.....	۵-۱-۴- نتایج گزارش شده
۸۶.....	۵-۲- سنتز کننده فرکانسی Fractional با استفاده از فیلتر Noise
۸۷.....	۵-۲-۱- تضعیف نویز مدولاتور با استفاده از فیلتر نویز
۸۹.....	۵-۲-۲- پیاده سازی مدار ی
۹۱.....	۵-۲-۳- نتایج گزارش شده
۹۴.....	۶- طراحی بلوکهای سازنده ی سنتز کننده
۹۴.....	۶-۱- طراحی اسیلاتور
۹۵.....	۶-۲- طراحی فیلتر
۱۰۰.....	۶-۳- طراحی PD
۱۰۱.....	۶-۴- طراحی پمپ بار
۱۰۴.....	۶-۵- طراحی تقسیم کننده ی فرکانسی
۱۰۴.....	۶-۵-۱- ساختار پیشنهادی برای تقسیم کننده فرکانسی
۱۰۷.....	۶-۵-۲- بررسی ساختار پیشنهادی از نظر توان مصرفی
۱۰۹.....	۶-۵-۳- پیاده سازی ساختار پیشنهادی
۱۱۲.....	۶-۶- طراحی مدولاتور دلتا - سیگما
۱۱۲.....	۶-۶-۱- ساختار مدولاتور HK-MASH
۱۱۴.....	۶-۶-۲- پیاده سازی مدولاتور
۱۱۴.....	۶-۷- کاهش نویز مدولاتور با استفاده از DAC Feedforward Cancellation

۱۱۷.....	۸-۶- مدولاسیون مستقیم با PLL
۱۱۹.....	۷- نتایج شبیه سازی
۱۲۴.....	۸- نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۲۴.....	۸-۱- نتیجه گیری
۱۲۵.....	۸-۲- پیشنهادات
۱۲۶.....	۹- مراجع

فهرست تصاویر

۶.....	شکل ۱-۲ ساختار پروتکل ZIGBEE
۸.....	شکل ۲-۲ باندهای فرکانسی مختلف در ZIGBEE
۱۱.....	شکل ۳-۲ استقرار چپها روی شاخه‌های I و Q یک مدولاتور OQPSK
۱۱.....	شکل ۴-۲ نمونه ای از شکل موج زنجیره چپها بعد از فیلترینگ half sine
۱۱.....	شکل ۵-۲ مراحل مختلف انجام مدولاسیون در ZIGBEE
۱۲.....	شکل ۶-۲ نمونه‌ای از شکل موج سیگنال در طی مراحل مختلف مدولاسیون
۱۴.....	شکل ۱-۳ سنتزکننده فرکانسی در یک گیرنده - فرستنده
۱۴.....	شکل ۲-۳ نمونه‌ای از سنتزکننده های فرکانسی DAS
۱۶.....	شکل ۳-۳ ساختار بلوکی یک DDS
۱۶.....	شکل ۴-۳ چرخ فاز دیجیتالی
۱۷.....	شکل ۵-۳ دیاگرام بلوکی یک حلقه قفل فاز از نوع Integer-N
۲۰.....	شکل ۶-۳ مدل خطی PLL
۲۱.....	شکل ۷-۳ پاسخ فرکانسی سیستم به ازای مقادیر مختلف ζ
۲۲.....	شکل ۸-۳ حاشیه فاز یک PLL مرتبه ۲ بر حسب ζ
۲۳.....	شکل ۹-۳ دو نمونه از فیلترهای پسیو مرتبه ۲
۲۴.....	شکل ۱۰-۳ اثر افزوده شدن یک قطب به فیلتر مرتبه یک بر حاشیه فاز سیستم
۲۴.....	شکل ۱۱-۳ حداکثر حاشیه فاز سیستم به ازای نسبت $C1/C2$
۲۶.....	شکل ۱۲-۳ کنترل تقسیم کننده در یک سنتزکننده Fractional با استفاده از یک Accumulator دیجیتال
۲۸.....	شکل ۱۳-۳ دیاگرام زمانی شامل سیگنال‌های خروجی VCO، تقسیم کننده و غیره به ازای $n=0.25$
۲۸.....	شکل ۱۴-۳ دیاگرام بلوکی یک $\Sigma\Delta$ Fractional-N PLL
۳۰.....	شکل ۱۵-۳ تعریف مفهوم نویز فاز
۳۲.....	شکل ۱۶-۳ اثرات نویز فاز و تن‌های ناخواسته در گیرنده و فرستنده
۳۳.....	شکل ۱۷-۳ مدل خطی نویز PLL
۳۶.....	شکل ۱۸-۳ چگالی طیف توان نویز در خروجی یک مدولاتور دلتا - سیگمای مرتبه ۳
۳۷.....	شکل ۱۹-۳ چگالی طیف توان نویز خروجی یک سنتزکننده ناشی از نویز مدولاتور
۳۹.....	شکل ۱-۴ منحنی مشخصه یک PD ایده‌آل
۳۹.....	شکل ۲-۴ گیت XOR به عنوان PD
۳۹.....	شکل ۳-۴ مشخصه خروجی یک PD مبتنی بر گیت XOR
۴۰.....	شکل ۴-۴ PD مبتنی بر فلیپ فلاپ SR و سیگنال‌های ورودی و خروجی و مشخصه‌ی خروجی این بلوک
۴۱.....	شکل ۵-۴ دیاگرام حالت یک Tri-state PFD

- شکل ۶-۴ منحنی مشخصه Tri-state PFD ۴۲
- شکل ۷-۴ پیاده سازی مداری Tri-state PFD ۴۳
- شکل ۸-۴ ناحیه مرده در منحنی مشخصه PFD ۴۳
- شکل ۹-۴ حذف ناحیه مرده در PFD با افزودن تأخیر در مسیر Reset فلیپ فلاپها ۴۳
- شکل ۱۰-۴ یک پمپ بار ساده بین PFD و فیلتر ۴۴
- شکل ۱۱-۴ رفتار گذرای پمپ بار و PFD ۴۵
- شکل ۱۲-۴ چند ساختار پیشنهاد شده برای پمپ بار با قرارگیری سوئیچها در گیت ، درین و سورس ۴۵
- شکل ۱۳-۴ تکنیک bootstrapping برای برطرف کردن مشکل charge sharing ۴۶
- شکل ۱۴-۴ رفتار پمپ بار در صورت عدم تطابق پالسهای ورودی ۴۷
- شکل ۱۵-۴ استفاده از pass-transistor برای برطرف کردن مشکل عدم انطباق پالسهای ورودی پمپ بار ۴۸
- شکل ۱۶-۴ ساختار پمپ بار با سوئیچهای ورودی یکسان ۴۸
- شکل ۱۷-۴ رفتار گذرای پمپ بار و ولتاژ کنترلی VCO ۴۹
- شکل ۱۸-۴ ساختار پمپ بار با سرعت سوئیچینگ مناسب ۵۰
- شکل ۱۹-۴ دیاگرام بلوکی یک اسپلاتور ۵۱
- شکل ۲۰-۴ ساختار یک اسپلاتور cross-coupled ۵۲
- شکل ۲۱-۴ دیاگرام بلوکی یک Pulse Swallow Divider ۵۵
- شکل ۲۲-۴ دیاگرام بلوکی یک تقسیم کننده Modular ۵۶
- شکل ۲۳-۴ ساختار داخلی یک زیر بلوک تقسیم بر $2/3$ ۵۸
- شکل ۲۴-۴ تقسیم کننده modular با رنج تقسیم گسترش یافته ۵۸
- شکل ۲۵-۴ ساختار یک D-Latch از نوع CML و مدار معادل آن در Latch mode ۶۰
- شکل ۲۶-۴ ساختار D-Latch از نوع CML یکپارچه شده با گیت NOR/OR ۶۰
- شکل ۲۷-۴ ساختار داخلی یک فلیپ فلاپ D از نوع TSPC ۶۱
- شکل ۲۸-۴ ساختار یک فلیپ فلاپ D از نوع TSPC یکپارچه شده با گیت AND در ورودی ۶۲
- شکل ۲۹-۴ دیاگرام بلوکی یک مدولاتور دلتا - سیگما از نوع single quantizer و مدل خطی شده آن ۶۴
- شکل ۳۰-۴ مقایسه توان دوم اندازه تابع تبدیل نوین مدولاتور مرتبه اول و دوم ۶۵
- شکل ۳۱-۴ اثر نوین مدولاتور دلتا - سیگما در نوین فاز خروجی سترکننده ۶۶
- شکل ۳۲-۴ چگالی طیف توان خروجی مدولاتور ۱۴ بیتی مرتبه ۳ ۶۷
- شکل ۳۳-۴ دیاگرام بلوکی یک SQ-DDSM ۶۹
- شکل ۳۴-۴ دیاگرام بلوکی یک EFM ۶۹
- شکل ۳۵-۴ پیاده سازی مدولاتور EFM مرتبه یک ۷۰
- شکل ۳۶-۴ دیاگرام بلوکی یک مدولاتور MASH متشکل از مدولاتورهای EFM مرتبه یک ۷۱
- شکل ۳۷-۴ دیاگرام بلوکی و مدل خطی یک مدولاتور EFM مرتبه یک ۷۲

- شکل ۴-۳۸ اعمال تکنیک *non-shaped LSB dithering* بر روی یک مدولاتور ۷۴
- شکل ۴-۳۹ چگالی طیف توان خروجی یک مدولاتور MASH با تکنیک *non-shaped LSB dithering* ۷۴
- شکل ۴-۴۰ دیاگرام بلوکی تکنیک *shaped LSB dithering* ۷۵
- شکل ۴-۴۱ طیف خروجی یک مدولاتور MASH به ازای ورودی ثابت $X=1$ و سطح کوانتایزر $M=2^9$ ۷۵
- شکل ۴-۴۲ طیف خروجی یک مدولاتور MASH با استفاده از فیلتر مرتبه ۲ در مسیر سیگنال *dither* ۷۶
- شکل ۵-۱ تکنیک *DAC Feedforward Cancellation* برای کاهش نویز مدولاتور ۷۸
- شکل ۵-۲ دیاگرام زمانی متناظر با عملکرد یک پمپ بار متعارف ۸۱
- شکل ۵-۳ پمپ بار پیشنهاد شده در [19] و دیاگرام زمانی متناظر با آن ۸۲
- شکل ۵-۴ تقسیم کننده فرکانسی استفاده شده در [19] ۸۳
- شکل ۵-۵ ساختار PFD استفاده شده در [19] ۸۴
- شکل ۵-۶ پمپ بار استفاده شده در [19] ۸۴
- شکل ۵-۷ نویز فاز خروجی سنتزکننده طراحی شده در [19] با فعال و غیرفعال کردن تکنیکهای معرفی شده ۸۵
- شکل ۵-۸ PLL به همراه فیلتر نویز برای کاهش نویز مدولاتور دلتا - سیگما [21] ۸۷
- شکل ۵-۹ مدل خطی نویز سنتزکننده دارای فیلتر نویز ۸۹
- شکل ۵-۱۰ ساختار سنتزکننده طراحی شده در [21] ۹۰
- شکل ۵-۱۱ ساختار پمپ بار استفاده شده در [21] ۹۱
- شکل ۵-۱۲ چگالی طیف توان سنتزکننده طراحی شده در [21] با پمپ بار متعارف و پیشنهادی ۹۲
- شکل ۵-۱۳ دامنه *reference spur* در طیف خروجی سنتزکننده طراحی شده در [21] ۹۳
- شکل ۵-۱۴ نویز فاز خروجی سنتزکننده طراحی شده در [21] ۹۳
- شکل ۶-۱ ساختار اسپیلاتور با دو زوج NMOS و PMOS نوع *cross-coupled* ۹۵
- شکل ۶-۲ فیلتر مرتبه ۳ پسیو ۹۶
- شکل ۶-۳ استفاده از سوئیچ میانی در فیلتر ۹۷
- شکل ۶-۴ ساختار PFD مورد استفاده در این پروژه ۱۰۱
- شکل ۶-۵ ساختار پمپ بار استفاده شده در این پروژه ۱۰۲
- شکل ۶-۶ جریان شاخه‌های خروجی پمپ بار قبل از اعمال فیدبک ۱۰۳
- شکل ۶-۷ جریان شاخه‌های خروجی پمپ بعد از اعمال فیدبک ۱۰۳
- شکل ۶-۸ ساختار پیشنهادی برای تقسیم کننده فرکانسی ۱۰۵
- شکل ۶-۹ ساختار داخلی بلوک MPG در تقسیم کننده پیشنهادی ۱۰۵
- شکل ۶-۱۰ مدار داخلی Prescaler یک زیر بلوک تقسیم بر $2/3$ ۱۰۸
- شکل ۶-۱۱ ساختار داخلی مدار تقسیم بر ۴ سنکرون ۱۰۸
- شکل ۶-۱۲ خروجی تقسیم کننده به ازای $N = 57$ و $f_{in} = 2.44 \text{ GHz}$ ۱۱۰
- شکل ۶-۱۳ نویز فاز خروجی تقسیم کننده ۱۱۱

- شکل ۶-۱۴ حساسیت ورودی تقسیم کننده در شرایط مختلف..... ۱۱۱
- شکل ۶-۱۵ ساختار تصحیح شده EFM مرتبه یک و مدل خطی شده آن..... ۱۱۲
- شکل ۶-۱۶ پیاده سازی EFM تصحیح شده..... ۱۱۳
- شکل ۶-۱۷ چگالی طیف توان مدولاتور طراحی شده..... ۱۱۵
- شکل ۶-۱۸ خطای کوانتیزاسیون تجمعی مدولاتور دلتا - سیگما..... ۱۱۷
- شکل ۶-۱۹ بخش NMOS بلوک DAC 5 بیتی طراحی شده برای مسیر Noise Cancellation..... ۱۱۷
- شکل ۷-۱ منحنی تغییرات فرکانس خروجی VCO به ازای تغییر ولتاژ کنترلی..... ۱۲۰
- شکل ۷-۲ نویز فاز خروجی VCO..... ۱۲۰
- شکل ۷-۳ ولتاژ کنترلی اسیلاتور در حالت تغییر فرکانس خروجی از 2.405GHz به 2.48GHz..... ۱۲۰
- شکل ۷-۴ چگالی طیف توان خروجی سنتزکننده..... ۱۲۱
- شکل ۷-۵ نویز فاز خروجی سنتزکننده..... ۱۲۱
- شکل ۷-۶ ولتاژ کنترلی اسیلاتور به همراه سیگنالهای I و Q در حالت مدولاسیون مستقیم..... ۱۲۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ مشخصه‌های مهم برخی از استانداردهای مخابراتی بی‌سیم برد کوتاه ۵
- جدول ۲-۲ کانالها در باندهای فرکانسی ZIGBEE ۸
- جدول ۳-۲ نحوه تبدیل سیمبل به چیب ۱۰
- جدول ۴-۲ مشخصات استاندارد ZIGBEE ۱۲
- جدول ۱-۳ مقادیر پارامترهای مربوط به تابع تبدیل فیلترهای ۱ و ۲ در شکل ۳-۹ ۲۳
- جدول ۱-۵ نتایج اندازه‌گیری سنتزکننده طراحی شده در [17] ۸۶
- جدول ۲-۵ نتایج گزارش شده در [19] ۹۲
- جدول ۱-۶ نحوه‌ی انتخاب فاز خروجی و نسبت تقسیم آنی زنجیره در ساختار پیشنهادی ۱۰۶
- جدول ۲-۶ مقایسه نتایج تقسیم‌کننده طراحی شده بر مبنای ساختار پیشنهادی با تقسیم‌کننده modular متعارف ۱۱۰
- جدول ۳-۶ مقایسه نتایج تقسیم‌کننده طراحی شده با تعدادی از کارهای قبلی ۱۱۱
- جدول ۴-۶ مقدار ضریب a در ساختار EFM تصحیح شده n_0 بیتی ۱۱۳
- جدول ۵-۶ مقایسه‌ی حداقل دوره تناوب قابل تضمین ساختارهای MASH و HK-MASH ۱۱۴
- جدول ۶-۶ نحوه پیاده‌سازی مدولاسیون مستقیم با سنتزکننده ۱۱۸
- جدول ۱-۷ توان مصرفی بلوکهای سازنده سنتزکننده فرکانسی ۱۲۱
- جدول ۲-۷ مقایسه نتایج سنتزکننده طراحی شده با مقادیر مورد نیاز استاندارد ZigBee ۱۲۲
- جدول ۳-۷ مقایسه نتایج سنتزکننده طراحی شده با تعدادی از کارهای قبلی ۱۲۳

۱- مقدمه

ZigBee استاندارد دسته‌ای از پروتکل‌های ارتباط سطح بالا است که در فرستنده و گیرنده‌های کم مصرف مبتنی بر IEEE802.15.4 برای شبکه‌های شخصی بی‌سیم با نرخ ارسال داده پایین استفاده می‌شود. ZigBee به منظور تعریف یک تکنولوژی ساده‌تر و ارزان‌تر از بلوتوث برای شبکه‌های ارتباطی شخصی بی‌سیم بوجود آمده است. ویژگی‌های استاندارد ZigBee عبارتند از کار در محدوده فرکانس 2.4 GHz با سرعت انتقال 250 kb/s و برد ۱۰ تا ۱۰۰ متر (بسته به قدرت فرستنده و ویژگی‌های محیط) [1].

ZigBee یک استاندارد برای شبکه‌های بی‌سیم با نرخ انتقال داده کم، کم هزینه و دارای توان مصرفی کم است. کم هزینه بودن اجازه می‌دهد تا این فناوری به طور گسترده‌ای در کاربردهای بی‌سیم نظارتی و کنترلی استفاده شود و توان مصرفی کم، کارکرد طولانی‌تر ادوات مبتنی بر این استاندارد با باتری‌های کوچک را میسر می‌سازد. از استاندارد ZigBee در کاربردهایی نظیر اتوماسیون و کنترل صنعتی، جمع‌آوری داده‌های پزشکی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۱، ادوات نظارتی و حفاظتی و... استفاده می‌شود.

یکی از بخش‌های مهم و اساسی در فرستنده و گیرنده‌های فرکانس بالا (از جمله در فرستنده - گیرنده‌های مبتنی بر ZigBee) سنتزکننده فرکانسی می‌باشد. وظیفه یک سنتزکننده فرکانسی تولید فرکانس یا فرکانس‌های لازم از یک فرکانس مرجع (و یا مجموعه‌ای از فرکانس‌های مرجع) می‌باشد. به این خاطر که خروجی یک سنتزکننده فرکانسی نقشی حیاتی در عملکرد یک سیستم دارد، بهبود مشخصه

¹ Wireless Sensor Network (WSN)

های آن از قبیل رزولوشن فرکانسی، jitter، نویز فاز و spurious tones همواره مد نظر بوده است.

روش‌های مختلفی برای طراحی سنتزکننده‌های فرکانسی معرفی شده است. روشی که اکثراً برای سنتز فرکانسی به صورت مجتمع مورد استفاده قرار می‌گیرد روش غیرمستقیم یا PLL based می‌باشد. PLL یک سیستم کنترلی است که سیگنال خروجی تولید می‌کند که فاز آن متناسب با فاز سیگنال ورودی است. این بلوک می‌تواند برای انجام مدولاسیون^۱ و دمدولاسیون^۲ یک سیگنال، بازیابی یک سیگنال دریافتی از یک کانال مخابراتی نویزی، تولید سیگنال خروجی در مضاربی از فرکانس سیگنال ورودی و نیز توزیع دقیق پالس ساعت در مدارات دیجیتالی مانند ریزپردازنده‌ها استفاده شود.

عنوان این پروژه طراحی سنتزکننده فرکانسی بر مبنای مدولاسیون نوع مستقیم برای استاندارد ZigBee می‌باشد که از دو بخش طراحی Fractional-N PLL و پیاده‌سازی مدولاسیون مستقیم با آن تشکیل شده است. با انجام مدولاسیون مستقیم به وسیله سنتزکننده می‌توان حداقل بلوک میکسر در مسیر ارسال داده‌ی یک گیرنده - فرستنده‌ی رادیویی را حذف کرد که این امر باعث کاهش توان مصرفی و فضای اشغالی سیستم می‌شود. سنتزکننده طراحی شده در این پروژه مشخصات مورد نیاز استاندارد ZigBee را کاملاً برآورده می‌کند. از این گذشته، با معرفی یک ساختار جدید برای پیاده‌سازی تقسیم‌کننده فرکانسی، توان مصرفی این بلوک را به میزان قابل توجهی کاهش دادیم. علاوه بر آن با بهینه‌سازی بلوکهای دیگر موفق شدیم توان مصرفی سیستم را به حدود 4.8 mW کاهش دهیم. برای پیاده‌سازی مدولاسیون مستقیم از تکنیک تزریق جریان آفست به فیلتر استفاده کرده و موفق شدیم به نرخ داده‌ی 714 kbps برسیم.

این پایاننامه در ۹ فصل تنظیم شده است. در فصل دوم استاندارد IEEE 802.15.4 / ZigBee معرفی شده و مشخصات این استاندارد به همراه باندهای فرکانسی و نوع مدولاسیون مورد نیاز آن شرح داده شده است. در فصل سوم ابتدا به معرفی انواع سنتزکننده‌های فرکانسی پرداخته و سپس با استخراج مدل خطی یک حلقه‌ی قفل فاز، رفتار گذرا و حالت دائمی این سیستم بررسی شده است. در بخش انتهایی این فصل به بررسی نویز فاز و تن‌های ناخواسته در طیف خروجی سنتزکننده و اثرات آنها در یک گیرنده - فرستنده پرداخته‌ایم. در فصل چهارم بلوک‌های مورد استفاده در سنتزکننده مورد بحث قرار گرفته و در فصل پنجم دو نمونه از کارهای معتبر گزارش شده در این حوزه به صورت مبسوط مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل ششم روند طراحی سنتزکننده شرح داده شده است. فصل هفتم به ارائه‌ی نتایج

¹ Modulation

² Demodulation

شبیه‌سازی‌های انجام گرفته اختصاص داده شده است. نتیجه‌گیری و پیشنهادات تکمیلی در فصل هشتم و مراجع مورد استفاده در فصل نهم ارائه شده‌اند.

۲- استاندارد ارتباطی برد کوتاه: IEEE 802.15.4/ZIGBEE

امروزه انتقال بی سیم اطلاعات بسیاری از جنبه های زندگی انسان را تحت تاثیر قرار داده است و نیاز به ادوات و وسایل متحرک، کارا و در عین حال متصل به سیستم های ارتباطی تبدیل به امری اجتناب ناپذیر شده است. از پخش سیگنال های رادیویی و تلویزیونی گرفته تا ارتباطات ماهواره ای، سیستم های تلفن همراه و اینترنت بی سیم مثال هایی هستند که اهمیت و گسترش این حوزه را می رسانند.

هر سیستم مبتنی بر انتقال بی سیم اطلاعات مشخصات ویژه ای از قبیل نرخ داده ارسالی، توان مصرفی و برد ارتباطی دارد و این موارد باند فرکانسی، پهنای باند مورد نیاز و توان ارسالی سیستم را تعیین می کنند. به خاطر محدودیت در پهنای باند در دسترس و همچنین جلوگیری از ایجاد تداخل بین سیگنال های ارسالی توسط منابع مختلف، مقرراتی تنظیم شده است که تعیین کننده ی باندهای فرکانسی مجاز برای هر کاربرد، حداکثر توان ارسالی مجاز روی هر فرکانس و باندهای فرکانسی ممنوع می باشد.

تدوین استانداردهای ارتباطی برد کوتاه برای پوشش انواع کاربردها از دو دهه پیش آغاز شده است. در سال ۱۹۹۷، IEEE استاندارد ۸۰۲،۱۱ را برای ارتباطات شبکه های محلی بی سیم (WLAN) بر مبنای نرخ داده ی 2 Mbps منتشر کرد. در سال ۱۹۹۹ استانداردهای 802.11b برای فرکانس 2.4 GHz با نرخ داده 11Mbps و 802.11a برای فرکانس 5GHz با نرخ داده 54Mbps معرفی شدند. نرخ داده بالا در این استانداردها، آنها را گزینه مناسبی برای استفاده در بسیاری از کاربردها کرده است. اما باید توجه داشت که این استانداردها برای شبکه های محلی بی سیم طراحی و بهینه سازی شده اند و اجزاء این شبکه ها نظیر کامپیوترهای لپ تاپ متصل به شبکه برق بوده یا از باتری های قابل شارژ تغذیه می شوند. از این

رو این استانداردها برای کاربردهای کم توان مناسب نیستند چون اساسا برای سیستم های با توان مصرفی کم طراحی نشده اند.

با افزایش کاربردهای برد کوتاهی که به نرخ داده بالا نیاز نداشته و در عوض نیازمند کاهش توان مصرفی هستند، استانداردهای جدیدی برای پاسخگویی به آنها تدوین شدند. استاندارد IEEE 802.15.1 (Bluetooth) در سال ۲۰۰۲ برای سیستمهای برد کوتاه، کم توان و با هزینه ساخت کم منتشر شد. نسخه 1.2 بلوتوث نرخ داده 1 Mbps را پشتیبانی می کند در حالی که در نسخه جدیدتر 4 این نرخ به 24 Mbps می رسد. حداکثر برد سیستمهای مبتنی بر این استاندارد حدود 100 متر می باشد. در برخی از کاربردها نظیر سنسورها، برچسب های هوشمند و لوازم الکتریکی خانگی نیاز داریم تا مصرف توان و هزینه تمام شده قسمت ارتباطی را بیش از میزانی که بلوتوث فراهم می کند، کاهش دهیم. برای چنین کاربردهایی استاندارد IEEE 802.15.4 در سال ۲۰۰۳ منتشر شده است. مشخصه های مهم برخی از استانداردهای مخابراتی بی سیم برد کوتاه در جدول ۱-۲ مقایسه شده است.

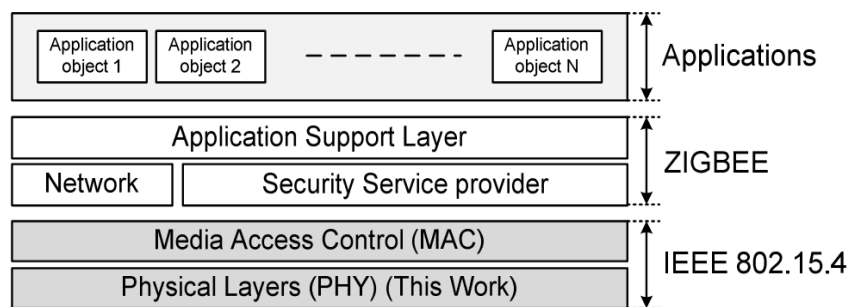
جدول ۱-۲ مشخصه های مهم برخی از استانداردهای مخابراتی بی سیم برد کوتاه

standard	IEEE 802.15.1 Bluetooth	IEEE 802.11b WiFi	IEEE 802.11g	IEEE 802.11a	IEEE 802.15.4 ZIGBEE
Max. data rate	1 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	250 kbps
Max. distance	10m	100m	100m	50m	30m
Frequency band	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz
Channel BW	1 MHz	25 MHz	25 MHz	20 MHz	3 MHz
Cost	\$	\$\$	\$\$\$	\$\$\$	\$
Power	Low	Moderate	High	High	Very Low

۱-۲- تعریف استاندارد IEEE 802.15.4/ZIGBEE

IEEE 802.15.4 استاندارد برای شبکه های بیسیم شخصی با نرخ داده کم (LR-WPAN) می

باشد که برای کاربردهای با توان مصرفی و نرخ داده کم بهینه شده است. همان گونه که در شکل ۱-۲ نشان داده شده، این استاندارد مشخص کننده ی زیرلایه فیزیکی (PHY) و زیرلایه نظارت بر دسترسی به رسانه انتقال (MAC) می باشد. زیرلایه فیزیکی وظیفه انتقال بیتها از طریق کانال مخابراتی را بر عهده دارد. مسائل طراحی در این لایه عمدتاً از نوع فیزیکی و الکتریکی است. از طرف دیگر زیرلایه MAC وظیفه کنترل نحوه دسترسی به خطوط انتقال را بر عهده دارد. کنترل آدرس فیزیکی فرستنده و گیرنده از وظایف دیگر این زیرلایه است [1].



شکل ۱-۲ ساختار پروتکل ZIGBEE

لایه های بالاتر توسط ZIGBEE تعیین می شوند. پروتکل ZIGBEE بر مبنای استاندارد IEEE 802.15.4 طراحی شده و توسط اتحادیه ی ZIGBEE پشتیبانی می شود. این پروتکل از مجموعه ای از لایه ها تشکیل شده است که لایه ی اجرایی مرتبط با کاربر را به لایه ی MAC متصل می کند. لایه های ZIGBEE دستورات نرم افزاری را تفسیر کرده و مجموعه دستورات اجرایی جدید را به لایه MAC منتقل می کنند. پیاده سازی برخی از وظایف سطح بالای مربوط به شبکه نظیر راه اندازی یک شبکه، اضافه کردن یا حذف کردن یک وسیله از شبکه ی موجود، مسیریابی و نیز ذخیره ی مسیرهای موجود توسط این بخش صورت می گیرد.

طول عمر باتری یک وسیله را می توان با کاهش توان مصرفی آن افزایش داد. همان گونه که رابطه (۱-۲) نشان می دهد، متوسط توان مصرفی یک فرستنده-گیرنده با مجموع وزنی توان مصرفی حالت های فعال و غیرفعال آن برابر است. توان مصرفی فعال توانی است که هنگام دریافت یا ارسال اطلاعات توسط فرستنده - گیرنده مصرف می شود در حالیکه توان مصرفی غیرفعال توانی است که در هنگام آماده به کار بودن سیستم مصرف می شود. Duty Cycle مشخص کننده ی درصد زمانی است که سیستم در وضعیت فعال قرار دارد.

$$P_{avg} = [P_{active} \times Duty Cycle] + [P_{inactive} \times (1 - Duty Cycle)] \quad (1-2)$$

کاهش Duty Cycle توان مصرفی متوسط سیستم را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. استاندارد IEEE 802.15.4 به نحوی طراحی شده است تا با Duty Cycle بسیار کم (زیر ۱٪) کار کند و این امر موجب کاهش توان مصرفی در سیستم‌های مبتنی بر این استاندارد می‌شود [2].

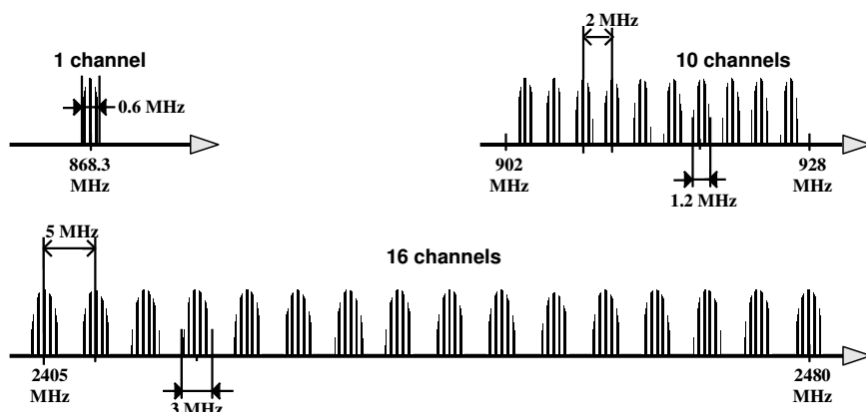
۲-۲- کاربردهای ZIGBEE

کاربردهایی که نرخ داده مورد نیاز آنها کم بوده و مصرف توان پایینی می‌طلبند در صورتی که مشخصه های IEEE 802.15.4 نیازمندیهای آنها را برطرف کند به سهولت می‌توانند از استاندارد ZIGBEE برای پیاده‌سازی آنها استفاده کرد. با توجه به این موارد برای بسیاری از کاربردها در زمینه‌های مختلف می‌توان از این استاندارد استفاده کرد. در کاربردهای صنعتی نظیر سیستم‌های مانیتورینگ، سنسورها و زنجیره‌های اتوماسیون تولید از ZIGBEE استفاده می‌شود. علاوه بر آن سیستم‌های کنترل محیطی، سیستم‌های حمل و نقل هوشمند، ریموت کنترل تلویزیونها یا سایر لوازم الکتریکی و سیستم‌های امنیتی منازل نیز از این استاندارد بهره می‌برند. کاربردهای پزشکی زمینه دیگری است که با توجه به بهینه بودن ZIGBEE برای بسیاری از آنها، به صورت فزاینده‌ای از این استاندارد استفاده می‌کنند. تمامی کاربردهای ذکر شده در باند فرکانسی 2.4 GHz (ISM) قابل پیاده‌سازی است. برخی از این کاربردها نظیر سیستم‌های امنیتی منازل نیازمند دسترسی به چندین کانال ارتباطی می‌باشند؛ در حالیکه برخی دیگر از آنها مانند ریموت کنترلرها صرفاً به یک کانال نیاز دارند. تمامی این موارد توسط استاندارد ZIGBEE پوشش داده می‌شود. از طرف دیگر نرخ داده‌های مختلف پوشش داده شده توسط این استاندارد (20 kbps تا 250 kbps) برای این کاربردها کافی است.

۲-۳- باندهای فرکانسی ZIGBEE

IEEE 802.15.4 سه باند فرکانسی مختلف را پوشش می‌دهد. اولین باند در فرکانس 868 MHz قرار داشته و صرفاً دارای یک کانال با نرخ داده 20 kbps و مدولاسیون BPSK است. این باند صرفاً در اروپا قابل استفاده است. باند دوم در فرکانس 915 MHz واقع بوده و دارای ۱۰ کانال ارتباطی است. هر یک از این کانال‌ها دارای نرخ داده 40 kbps بوده و از مدولاسیون BPSK استفاده می‌کنند. این باند نیز صرفاً در امریکا، استرالیا و معدودی از کشورهای امریکای جنوبی پشتیبانی می‌شود. باند فرکانسی سوم

در محدوده 2.4 GHz قرار داشته و دارای ۱۶ کانال با نرخ داده 250 kbps می‌باشد. این باند از مدولاسیون OQPSK با شکل دهی موجی half sine استفاده می‌کند. این باند تقریباً در همه کشورها در دسترس می‌باشد و استفاده آزاد از آن امکان پذیر است. یک فرستنده - گیرنده مبتنی بر استاندارد IEEE 802.15.4/ZIGBEE می‌بایست هر دو باند فرکانسی اول و دوم را به صورت همزمان پوشش دهد و یا از باند فرکانسی سوم استفاده کند. شکل ۲-۲ باندهای فرکانسی ZIGBEE را نشان می‌دهد. اطلاعات بیشتری در مورد شماره کانالها و نیز فاصله کانالها از هم در باندهای فرکانسی مختلف در جدول ۲-۲ ارائه شده است.



شکل ۲-۲ باندهای فرکانسی مختلف در ZIGBEE [3]

جدول ۲-۲ کانالها در باندهای فرکانسی ZIGBEE [1] و [4]

باند فرکانسی	فرکانس مرکزی کانال	شماره کانال	فاصله کانال ها
868 MHz	868.3 MHz	$K = 0$	-
915 MHz	$906 + 2(K-1)$ MHz	$K = 1, 2, 3, \dots, 10$	2 MHz
2400 MHz	$2405 + 5(K-11)$ MHz	$K = 11, 12, \dots, 26$	5 MHz

به دلیل پوشش سراسری باند فرکانسی 2.4 GHz در اکثر کشورها، طراحی سنتزکننده فرکانسی در این پروژه برای این باند انجام شده است.